

1/3,DS/1  
 DIALOG(R)File 345:Inpadoc/Fam.& Legal Stat  
 (c) 2001 EPO. All rts. reserv.

Acc no: 14676291  
 Basic Patent (No,Kind,Date): JP 10242556 A2 980911  
 <No. of Patents: 001>  
 ER-DOPED OPTICAL FIBER AMPLIFIER FOR WAVELENGTH MULTIPLEX TRANSMISSION (English)  
 Patent Assignee: HITACHI CABLE  
 Author (Inventor): IMOTO KATSUYUKI  
 IPC: \*H01S-003/10; H01S-003/17  
 Derwent WPI Acc No: \*G 98-548712; G 98-548712  
 Language of Document: Japanese  
 Patent Family:  

Patent No	Kind	Date	Applic No	Kind	Date
JP 10242556	A2	980911	JP 9739303	A	970224 (BASIC)

 Priority (No,Kind,Date): JP 9739303 A 970224

1/9/1  
 DIALOG(R)File 347:JAPIO  
 (c) 2001 JPO & JAPIO. All rts. reserv.

05959456 \*\*Image available\*\*  
 ER-DOPED OPTICAL FIBER AMPLIFIER FOR WAVELENGTH MULTIPLEX TRANSMISSION

PUB. NO.: 10-242556 [JP 10242556 A]  
 PUBLISHED: September 11, 1998 (19980911)  
 INVENTOR(s): IMOTO KATSUYUKI  
 APPLICANT(s): HITACHI CABLE LTD [000512] (A Japanese Company or Corporation), JP (Japan)  
 APPL. NO.: 09-039303 [JP 9739303]  
 FILED: February 24, 1997 (19970224)  
 INTL CLASS: [6] H01S-003/10; H01S-003/17  
 JAPIO CLASS: 42.2 (ELECTRONICS -- Solid State Components)  
 JAPIO KEYWORD: R002 (LASERS); R012 (OPTICAL FIBERS)

#### ABSTRACT

PROBLEM TO BE SOLVED: To suppress the occurrence of waveform distortion by eliminating the possibility of the induction of a nonlinear phenomenon even when the multiplexing number of wavelengths increases by adjusting the effective core diameter of an Er-doped optical fiber to a specific value or larger and constituting an optical fiber amplifier so that the zero dispersion wavelength may become a wavelength on the outside of a specific wavelength band.

SOLUTION: In an Er-doped optical fiber which is used for constituting an Er-doped optical fiber amplifier for wavelength multiplex transmission, seven cores (having refractive indexes of  $n_{(sub\ w)}$ ) 10 to which both Er and Al are added are formed in a clad 8 and an intermediate layer (having a refractive index  $N_{(sub\ i)}$ ) 9 is provided on the outer periphery of each core 10. Each core has a diameter D and the interval between each core is S. Figure (b) shows the refractive index distribution in the optical fiber. The relative refractive-index difference between each core 10 and clad (having a refractive index  $n_{(sub\ s)}$ ) 8 (or the intermediate layer 9) is expressed as  $\Delta n$ . Then the effective core diameter of the optical fiber at 1.55  $\mu m$  is adjusted to  $\geq 9 \mu m$  and the zero dispersion wavelength is adjusted to a wavelength longer than 1.53-1.56  $\mu m$  by appropriately setting the values of the  $\Delta n$ , D, and S.

先行技術(1)  
01-0139

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平 10 - 2 4 2 5 5 6

(43)公開日 平成10年(1998)9月11日

(51)Int. Cl.<sup>6</sup>

H 0 1 S 3/10  
3/17

識別記号

F I

H 0 1 S 3/10 Z  
3/17

審査請求 未請求 請求項の数 10

O L

(全 1 1 頁)

(21)出願番号 特願平9-39303

(22)出願日 平成9年(1997)2月24日

(71)出願人 000005120

日立電線株式会社  
東京都千代田区丸の内二丁目1番2号

(72)発明者 井本 克之

茨城県土浦市木田余町3550番地 日立電線  
株式会社アドバンスリサーチセンタ内

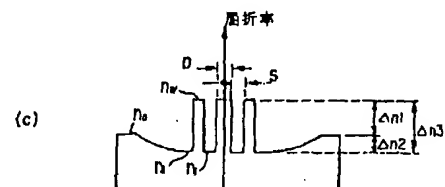
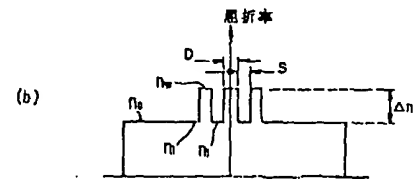
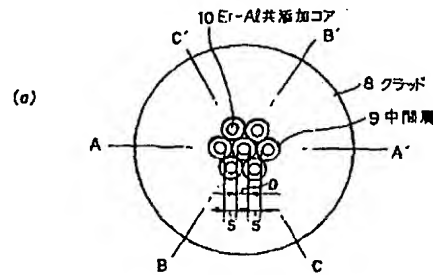
(74)代理人 弁理士 平田 忠雄

(54)【発明の名称】波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器

(57)【要約】

【課題】波長多重数が8波、16波、32波、64波・  
・のように増えても非線形現象の誘発のおそれがなく、その現象による波形歪みの発生を抑え、1.53μmから1.56μmの波長帯域にわたって平坦な利得特性を有し、ホールバーニングに依存した偏光依存性による利得の偏差を小さくする、等の効果を有した波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を提供する。

【解決手段】波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を実現するEr添加光ファイバにおいて、波長1.55μmにおける有効断面積から求めた有効コアの径を9μm以上にし、かつ、ゼロ分散波長を1.53μmから1.56μmの範囲外の波長にする。



B1

## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】Er と A1 を共添加したコアの外側にクラッドを設けた Er 添加光ファイバに波長多重された複数波の信号光と、前記信号光の波長と異なった波長の励起光を伝搬させて前記信号光を増幅する波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器において、

前記 Er 添加光ファイバは、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における有効断面積から求めた有効コア径が 9  $\mu\text{m}$  以上で、ゼロ分散波長が 1.53  $\mu\text{m}$  から 1.56  $\mu\text{m}$  の波長帯域以外の波長になるように構成されたことを特徴とする波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 2】前記コアは、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より大なる屈折率を有した少なくとも 3 個のコアによって構成された請求項 1 記載の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 3】前記少なくとも 3 個のコアは、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より小なる屈折率  $n_i$  を有した中間層によってそれぞれ被覆されている構成の請求項 2 記載の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 4】前記少なくとも 3 個のコア、前記中間層、および前記クラッドは、前記コアの屈折率と前記クラッドの屈折率  $n_c$  の比屈折率差、および前記コアの屈折率と前記中間層の屈折率  $n_i$  の比屈折率差が、それぞれ 1% から 2.5% の範囲にあるように構成された請求項 3 記載の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 5】前記コアは、所定の直径を有し、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より大なる屈折率  $n_w$  を有した中心コアと、前記屈折率  $n_w$  より小なる屈折率  $n_i$  を有した所定の幅の中間層を介して前記中心コアの外側に設けられ、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より大なる屈折率  $n_r$  を有した外側コアによって構成された請求項 1 記載の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 6】前記外側コアは、前記クラッドとの間に設けられ、前記屈折率  $n_i$  の他の中間層によって被覆されている構成の請求項 5 記載の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 7】前記中心コア、前記中間層、前記外側コア、前記他の中間層、および前記クラッドは、前記屈折率  $n_w$  と前記屈折率  $n_c$  の比屈折率差、前記屈折率  $n_r$  と前記屈折率  $n_c$  の比屈折率差、前記屈折率  $n_w$  と前記屈折率  $n_i$  の比屈折率差、および前記屈折率  $n_r$  と前記屈折率  $n_i$  の比屈折率差が、それぞれ、1% から 2.5% の範囲にあるように構成された請求項 6 記載の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 8】前記コアは、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より大なる屈折率  $n_w$  を有した中心に位置する第 1 のコアと、前記第 1 のコアの外側に位置し、前記屈折率  $n_w$  より大なる屈折率  $n_r$  を有した第 2 のコアより構成された請求項 1 記載の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 9】Er と A1 を共添加したコアの外側にクラッドを設けた Er 添加光ファイバに入力用光ファイバからアイソレータ等の第 1 の光部品を介して波長多重された複数波の信号光を入射し、かつ、前記 Er 添加光ファイバに WDM カブラ等の第 2 の光部品を介して前記信号光の波長と異なった波長の励起光を入射して前記信号光を増幅し、増幅された前記信号光を前記 Er 添加光ファイバから出力用光ファイバを介して伝送ラインに出力する波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器において、前記 Er 添加光ファイバは、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における有効コア断面積から求めた有効コア径が 9  $\mu\text{m}$  以上であり、ゼロ分散波長が 1.53  $\mu\text{m}$  から 1.56  $\mu\text{m}$  の波長帯域以外の波長になるように構成され、

前記入力用光ファイバ、および前記出力用光ファイバは、有効断面積から求めた有効コア径が 9  $\mu\text{m}$  以上であるように構成されたことを特徴とする波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

【請求項 10】前記第 1 および第 2 の光部品には、分散補償機能をもった光部品が含まれていることを特徴とする請求項 9 記載の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は波長多重伝送用光ファイバ増幅器に関し、特に、波長多重数が増えても非線形現象が誘発されず、それによって波形歪みを抑制し、所定の広波長帯域にわたって平坦な利得特性を実現する波長多重伝送用光ファイバ増幅器に関する。

## 【0002】

【従来の技術】近年、光ファイバのコア内に Er, Pr, Nd の希土類元素を添加した光ファイバ増幅器が実用レベルに達するようになってきた。特に、Er を添加した光ファイバ増幅器は、1.55  $\mu\text{m}$  帯において、高利得、高飽和出力を有することから、種々のシステムへの適用が考えられている。その中でも、1.53  $\mu\text{m}$  から 1.56  $\mu\text{m}$  の波長帯域において、数波から数十波の信号光を用いた波長多重伝送による高速、大容量、長距離伝送システムや光 CATV システムへの適用が注目されている。

【0003】図 8 は従来の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器を示す。この波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器は、所定の長さの Er 添加光ファイバ 1 の両端に WDM カブラ 4a, 4b を配置して励起光源 3a, 3b を結合させ、WDM カブラ 4a の入力側に光アイソレータ 2a を配置するとともに WDM カブラ 4b の出力側に光アイソレータ 2b を配置して構成されている。

【0004】この波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器において、波長多重された信号光 5a は光ファイバ 14a から入力側に設けられた光アイソレータ 2a を通

ってWDMカブラ4aに入り、ここで励起光源3aからの励起光6aと合流され、その後接続されたEr添加光ファイバ1内に信号光5b、励起光6bとして入射される。励起光6bの大部分はEr添加光ファイバ1内で吸収されて反転分布状態を形成して信号光5bを増幅し、信号光5cとして出力側に伝送される。一方、励起光源3bからの励起光6cがWDMカブラ4bを通して信号光5cの伝搬方向と反対方向に励起光6dとして伝搬し、Er添加光ファイバ1内で大部分が吸収され、信号光5bを増幅して信号光5cとする。増幅された信号光5cはWDMカブラ4b、光アイソレータ2bを通して信号光5dとして光ファイバ14bから出力される。

【0005】図9および図10は図8に用いられるEr添加光ファイバ1を示す。図9(a)のEr添加光ファイバ1は、ErとAlの共添加されたコア7と、その外周に設けられたクラッド8からなるステップ型屈折率分布の光ファイバであり、コア7の直径Dは、高利得、高効率、高飽和出力特性を実現するために、3~4μmである。図9(b)は、コア7の屈折率 $n_w$ とクラッド8の屈折率 $n_c$ との比屈折率差 $\Delta n$ を示す。この $\Delta n$ は1.5%から2.2%の範囲のものが用いられている。

【0006】図1(a)のEr添加光ファイバ1はErとAlの共添加されたコア(直径D)7と、その外周に設けられた中間層9と、その外周に設けられたクラッド8を有し、中間層9の幅Gは0.数μmから10μmの範囲から選ばれる。図10(b)はコア7の屈折率 $n_w$ 、中間層9の屈折率 $n_l$ 、およびクラッド8の屈折率 $n_c$ の比屈折率差 $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$ 、および $\Delta n_3$ を示し、 $\Delta n_1$ は1.5%程度が選ばれ、 $\Delta n_2$ は0.7%程度が選ばれ、 $\Delta n_3$ は2.0%から2.4%の範囲から選ばれる。

【0007】図9および図10のEr添加光ファイバ1の有効コア径は5μmから8μm程度の値である。有効コア径は有効コア断面積から求められるものであり、有効コア断面積は次式から求められる。

【0008】

【数1】

$$A = \frac{\pi k}{4} (\text{MFD})^2$$

【0009】ここで、Aは有効コア断面積、kは比例係数(〜0.96)、MFDはモードフィールド径を表す。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】しかし、従来の波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器は以下の問題点を有している。

(1) 波長多重数が8波、16波、32波・・・のように増えてくると、Er-A1共添加コア7内を伝搬する

光エネルギー密度が非常に高くなってくるが、有効コア径が5μm前後と小さいので、非線形現象の誘発によって波形歪みをまねく。

(2) 有効コア径を9μm以上の大きな値にすると、利得低下、飽和出力の低下、利得の波長特性の平坦性の劣化、等をまねく。

(3) 波長多重数が増えてくると、コア7内を伝搬する信号光パワーが増大してくるため、ホールバーニングに依存した偏光依存性による利得の偏差が大きくなる。このため、光ファイバ増幅器をカスケードに10段、20段と接続したシステムでは、この利得偏差が数dBから10dB近くにも大きくなってきてシステム的に問題となってくる。

(4) 1.53μmから1.56μmの波長帯域を用いて波長多重伝送を行う場合には、この波長帯域での波長分散特性をできる限り平坦にするか、あるいは負の大きな分散値を有するようにすることが望ましいが、それを実現させることができない。

【0011】一方、発明者は、ErとAlを共添加した7個のコアを有する光ファイバを使用して、1.55μmの波長において、10μm程度のモードフィールド径(MFD)を実現し、これによりシングルモード光ファイバとの結合効率を改善したEr添加マルチコアファイバ増幅器を提案した。しかし、このEr添加光マルチコアファイバ増幅器によっても、波長多重数が増加したとき、前述した非線形現象の誘発に基づく波形歪みの発生、等の問題点を解消することができない。

【0012】従って、本発明の目的は、波長多重数が増加しても非線形現象の誘発のおそれがなく、それによって波形歪みの発生を抑制することができる波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を提供することにある。本発明の他の目的は、1.53μmから1.56μmの波長帯域で平坦な利得特性を有する波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を提供することにある。

【0013】本発明の他の目的は、利得特性、飽和出力特性、等の特性を容易に制御することができる波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を提供することにある。本発明の他の目的は、波長多重数が増加してもホールバーニングに依存した偏光依存性による利得の偏差を小さく抑え、それによって、増幅器段が10段、20段と増加してもこの利得の偏差を小さく抑えて光信号/雑音の比を低下させないようにした波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を提供することにある。

【0014】本発明の他の目的は、光ファイバ間の接続を容易にし、接続損失を小さくする波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を提供することにある。本発明の他の目的は、大容量の情報を高速で長距離伝送することができる波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を提供することにある。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明は上記の目的を達成するため、以下の波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。本発明の第 1 の特徴によると、E r と A 1 を共添加したコアの外側にクラッドを設けた E r 添加光ファイバに波長多重された複数波の信号光と、前記信号光の波長と異なった波長の励起光を伝搬させて前記信号光を増幅する波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器において、前記 E r 添加光ファイバは、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における有効断面積から求めた有効コア径が 9  $\mu\text{m}$  以上で、ゼロ分散波長が 1.53  $\mu\text{m}$  から 1.56  $\mu\text{m}$  の波長帯域以外の波長になるように構成された波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。

【0016】本発明の第 2 の特徴によると、前記コアは、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より大なる屈折率を有した少なくとも 3 個のコアによって構成された波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。本発明の第 3 の特徴によると、前記少なくとも 3 個のコアは、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より小なる屈折率  $n_i$  を有した中間層によってそれぞれ被覆されている構成の波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。

【0017】本発明の第 4 の特徴によると、前記少なくとも 3 個のコア、前記中間層、および前記クラッドは、前記コアの屈折率と前記クラッドの屈折率  $n_c$  の比屈折率差、および前記コアの屈折率と前記中間層の屈折率  $n_i$  の比屈折率差が、それぞれ 1% から 2.5% の範囲にあるように構成された波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。

【0018】本発明の第 5 の特徴によると、前記コアは、所定の直径を有し、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より大なる屈折率  $n_w$  を有した中心コアと、前記屈折率  $n_w$  より小なる屈折率  $n_i$  を有した所定の幅の中間層を介して前記中心コアの外側に設けられ、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より大なる屈折率  $n_r$  を有した外側コアによって構成された波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。

【0019】本発明の第 6 の特徴によると、前記外側コアは、前記クラッドとの間に設けられ、前記屈折率  $n_i$  の他の中間層によって被覆されている構成の波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。本発明の第 7 の特徴によると、前記中心コア、前記中間層、前記外側コア、前記他の中間層、および前記クラッドは、前記屈折率  $n_w$  と前記屈折率  $n_i$  の比屈折率差、前記屈折率  $n_r$  と前記屈折率  $n_i$  の比屈折率差、前記屈折率  $n_w$  と前記屈折率  $n_i$  の比屈折率差、および前記屈折率  $n_r$  と前記屈折率  $n_i$  の比屈折率差が、それぞれ、1% から 2.5% の範囲にあるように構成された波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。

【0020】本発明の第 8 の特徴によると、前記コアは、前記クラッドの屈折率  $n_c$  より大なる屈折率  $n_w$  を有した中心に位置する第 1 のコアと、前記第 1 のコアの

外側に位置し、前記屈折率  $n_w$  より大なる屈折率  $n_r$  を有した第 2 のコアより構成された波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。本発明の第 9 の特徴によると、E r と A 1 を共添加したコアの外側にクラッドを設けた E r 添加光ファイバに入力用光ファイバからアイソレータ等の第 1 の光部品を介して波長多重された複数波の信号光を入射し、かつ、前記 E r 添加光ファイバに WDM カプラ等の第 2 の光部品を介して前記信号光の波長と異なった波長の励起光を入射して前記信号光を増幅し、増幅された前記信号光を前記 E r 添加光ファイバから出力用光ファイバを介して伝送ラインに出力する波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器において、前記 E r 添加光ファイバは、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における有効コア断面積から求めた有効コア径が 9  $\mu\text{m}$  以上であり、ゼロ分散波長が 1.53  $\mu\text{m}$  から 1.56  $\mu\text{m}$  の波長帯域以外の波長になるように構成され、前記入力用光ファイバ、および前記出力用光ファイバは、有効断面積から求めた有効コア径が 9  $\mu\text{m}$  以上であるように構成されたことを特徴とする波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。

【0021】本発明の第 10 の特徴によると、前記第 1 および第 2 の光部品には、分散補償機能をもった光部品が含まれている波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を提供する。ここで、分散補償機能をもった光部品としては、たとえば、分散補償ファイバ、光サーキュレータ付きファイバグレーディングなどである。本発明の波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器によれば、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における有効コア径を 9  $\mu\text{m}$  以上にし、かつ、ゼロ分散波長 1.53  $\mu\text{m}$  から 1.56  $\mu\text{m}$  の波長帯域外の波長にしたので、波長多重数を 8 波、16 波、32 波・・・のように増加しても、非線形現象が発生しにくく、波形歪みをまねかない。しかも、有効コア径を 9  $\mu\text{m}$  以上にしても波長 1.53  $\mu\text{m}$  から 1.56  $\mu\text{m}$  の波長帯域にわたって平坦な利得特性を実現することができる。また、波長多重数が増加しても、信号光のパワが各コア内を分配されて伝搬していくため、ホールバーニングに依存した偏光依存性による利得の偏差が極めて小さい。その結果、10 段、20 段の光ファイバ増幅器をカスケードに接続しても、この利得の偏差を小さく抑えることができ、光信号/雑音の劣化が小さいシステムを構築することが出来る。さらに、光ファイバ増幅器に用いるファイバ型部品（光アイソレータ、WDM フィルタ、等）及び入出力用光ファイバの有効コア径を 9  $\mu\text{m}$  以上にしているので、これらのファイバ間の接続損失を小さくすることができ、また接続も容易となる。また、非線形現象を抑圧することができること、等の効果を期待することができる。

【0022】以上のように、本発明の波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器は、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における有効コア断面積から求めた有効コア径が 9  $\mu\text{m}$  以上で、

かつ、ゼロ分散波長が $1.53\mu\text{m}$ よりも短い波長が、 $1.56\mu\text{m}$ よりも長い波長になるように光ファイバ構造を特定することにより、自己位相変調効果、相互位相変調効果による信号スペクトルの広がり、分散による波形劣化を抑圧することができ、かつ、四光波混合による干渉雑音も抑圧することができる。従って、波長 $1.53\mu\text{m}$ から $1.56\mu\text{m}$ の波長帯域で信号光を8波、16波、32波・・・のように多重伝送してもそれぞれの信号光をほぼ一様な増幅度で増幅し、かつ、それぞれの信号光への雑音の付加量も低くしてほぼ一様な値に抑えることができる。

#### 【0023】

【発明の実施の形態】図1(a)は本発明の波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を実現するEr添加光ファイバの構成を示す。このEr添加光ファイバは、クラッド8内にErとAlの共添加された7個のコア(屈折率 $n_w$ )10が形成され、各コア10の外周に中間層(屈折率 $n_i$ )9が設けられている。各コア10の直径はDであり、各コア10の間隔はSである。図1(a)の構成において、図1(b)は第1の実施の形態の屈折率の分布を示し、クラッド(屈折率 $n_c$ )8には $\text{SiO}_2$ が用いられ、中間層9にも $\text{SiO}_2$ が用いられ、各コア10にはErとAlの共添加された $\text{SiO}_2-\text{GeO}_2$ 系ガラスが用いられる。各コア10とクラッド8(あるいは中間層9)との比屈折率差は $\Delta n$ で表されている。この構成において、 $\Delta n$ 、D及びSの値を適切に設定することにより、 $1.55\mu\text{m}$ における有効コア径を $9\mu\text{m}$ 以上とし、ゼロ分散波長を $1.53\mu\text{m}\sim 1.56\mu\text{m}$ 以外の波長にしている。その具体例として、例えば、 $D=1.88\mu\text{m}$ 、 $S=1.24\mu\text{m}$ 、 $\Delta n=1.5\%$ に設定すると、有効コア径は $9.88\mu\text{m}$ 、ゼロ分散波長は $1415\text{nm}$ である。また、 $D=2.35\mu\text{m}$ 、 $S=1.55\mu\text{m}$ 、 $\Delta n=1.5\%$ に設定すると、有効コア径は $9.27\mu\text{m}$ 、ゼロ分散波長は $1455\text{nm}$ である。ただし、いずれの場合もクラッド8の外径は $125\mu\text{m}$ である。図1(a)の構成において、図1(c)は第2の実施の形態の屈折率分布を示し、クラッド(屈折率 $n_c$ )8にはフッ素がクラッド内側に向かって添加された $\text{SiO}_2$ ガラスを用い、中間層9にはフッ素を添加した $\text{SiO}_2$ を用い、各コア10にはErとAlの共添加された $\text{SiO}_2-\text{GeO}_2$ 系ガラスを用いる。ここでクラッド8内の屈折率が外側から内側に向かって低くなるような分布をもつのは、F素を添加した中間層9で覆われた、ErとAlの共添加されたコア10をそれぞれF素を添加した $\text{SiO}_2$ 管内に挿入し、上記F素を添加した $\text{SiO}_2$ 管の外側から酸水素パーナにより加熱して上記管内を中実のロッドにする工程で上記管外側近傍のF素が蒸発して外にでていってしまうからである。このように、クラッド8内に屈折率分布をもたせると、有効コア径を大きく保った状態で、かつ、曲げ損

失を小さくすることができるという特徴がある。各コア10とクラッド8との比屈折率差は $\Delta n_1$ であり、最外側のクラッド8と中間層9との比屈折率差は $\Delta n_2$ であり、各コア10と中間層9との比屈折率差は $\Delta n_3$ である。この構成において、 $\Delta n_1\sim\Delta n_3$ 、DおよびSの値を適切に設定することにより、 $1.55\mu\text{m}$ における有効コア径を $9\mu\text{m}$ 以上にし、ゼロ分散波長を $1.53\mu\text{m}\sim 1.56\mu\text{m}$ 以外の波長にしている。その具体例として、例えば、 $D=1.3\mu\text{m}$ 、 $S=1.38\mu\text{m}$ とすると、有効コア径は $9.6\mu\text{m}$ 、ゼロ分散波長は $1495\text{nm}$ である。また、 $D=1.2\mu\text{m}$ 、 $S=1.25\mu\text{m}$ とすると、有効コア径は $10.2\mu\text{m}$ 、ゼロ分散波長は $1470\text{nm}$ である。これらの結果は、本発明者が種々の実験結果から初めて見いだしたものである。ただし、いずれの場合もクラッド8の外径は $125\mu\text{m}$ である。これらのEr添加光ファイバを図8の光ファイバ増幅器に用いた場合、信号光と励起光は各コア10内にほぼ均等に分配されて伝搬し、出力側に高利得で、かつ広い波長域( $1530\sim 1560\text{nm}$ )にわたってほぼ平坦な利得が得られる。また、有効コア径が $9\mu\text{m}$ 以上であるので、Er添加光ファイバ内に8チャンネル以上の波長の異なった信号光を波長多重伝送しても非線形現象による波形歪みの発生を抑圧することができる。さらに、ゼロ分散波長も波長 $1.53\mu\text{m}\sim 1.56\mu\text{m}$ 以外の波長に設定されているので、四光波混合による干渉雑音の付加も抑圧することができる。一般的に、8チャンネルのように、多チャンネルの波長多重された信号光が伝送されると信号光が増大し、ホールバーニングによる偏光依存性が生じ、増幅された利得が変動するが、本発明の実施の形態では、各コア10内に信号光が分配されて伝送されるために、ホールバーニングによる偏光依存性が大幅に減少し、非常に安定した利得を得ることができる。

【0024】図2(a)は本発明の波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を実現するEr添加光ファイバの他の構成を示す。このEr添加光ファイバはErとAlの共添加された $\text{SiO}_2-\text{GeO}_2$ 系ガラスからなる直径Dの第1のコア(屈折率 $n_w$ )11を有し、その外周を第1の中間層(屈折率 $n_i$ )9aで覆う。この中間層9aの幅はSであり、その外周をErとAl共添加された $\text{SiO}_2-\text{GeO}_2$ 系ガラスからなる幅Wの第2のコア(屈折率 $n_w$ )12で覆い、その第2のコア12の外周に、幅Sの第2の中間層(屈折率 $n_i$ )9bを設け、その第2の中間層9bの外周にクラッド(屈折率 $n_c$ )8を設けている。図2(a)の構成において、図2

(b)は、第3の実施の形態の屈折率分布を示す。ここで第1および第2の中間層9aおよび9bは $\text{SiO}_2$ ガラスであり、 $\Delta n$ を $1.5\%$ 、Sを $0.5\mu\text{m}\sim 1.3\mu\text{m}$ 、DとWを $2.4\mu\text{m}$ 以下に設定する。また、図2(c)は第4の実施の形態の屈折率分布を示す。ここで

第1および第2の中間層9aおよび9bはフッ素を添加したSiO<sub>2</sub>ガラスであり、 $\Delta n_1$ を1.5%、 $\Delta n_2$ を0.7%、DとWを2.4 $\mu$ m以下、好ましくは、1.2 $\mu$ m以下に設定する。このEr添加光ファイバを図8の光ファイバ増幅器に用いた場合も図1のEr添加光ファイバとほぼ同様の効果を得ることができる。信号光と励起光は第1のコア11と第2のコア12内に分配されて伝送する。この分配の度合いは第1のコア11の直径Dと、第2のコア12の幅Wと、コア間隔Sに依存する。この構成によって、波長1.55 $\mu$ mにおける有効コア径を9 $\mu$ m以上にし、ゼロ分散波長を1.53 $\mu$ m $\sim$ 1.56 $\mu$ mの範囲外の波長にし、かつ、コア11とコア12内への信号光および励起光の分配の度合いを一樣にすることができる。

【0025】図3(a)は本発明の波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を実現するEr添加光ファイバの他の構成を示し、図2(a)と同一の構成を有するが、図3(b)(c)の第5および第6の実施の形態としての屈折率分布は、図2(b)(c)の屈折率分布と異なっている。図3(b)および(c)において、ErとAlの共添加された第1のコア11の屈折率 $n_w$ を第2のコア12の屈折率 $n_r$ よりもわずかに低くし、第1のコア11と第2のコア12内を伝搬する信号光および励起光のパワをほぼ均等にしている。比屈折率 $\Delta n$ 、 $\Delta n'$ 、 $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_1'$ 、 $\Delta n_2$ 、 $\Delta n_3$ は図示の通りである。これによって、第1のコア11と第2のコア12の屈折率を等しくしたときに、信号光および励起光が第1のコア11の方に強く励振されて伝搬するのを抑える。第1のコア11と第2のコア12内に信号光と励起光がほぼ均等に分配されることにより、波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器の飽和出力を高くすることができる。

【0026】図4(a)は本発明の波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を実現するEr添加光ファイバの他の構成を示し、図2(a)および図3(a)と同一の構成を有するが、図4(b)(c)は、前述した実施の形態と相違する第7および第8の実施の形態としての屈折率分布を示している。この屈折率分布を形成する比屈折率 $\Delta n$ 、 $\Delta n'$ 、 $\Delta n_1 \sim \Delta n_4$ は図示の通りである。この屈折率分布によって、第1のコア(屈折率 $n_w$ )11と第2のコア(屈折率 $n_w$ )12を伝搬する信号光および励起光のパワをほぼ等しくすることができる。この屈折率分布は、中間層9bの屈折率 $n_{12}$ を中間層9aの屈折率 $n_{11}$ より下げて第2のコア12への信号光および励起光の閉じ込め率を高めている。これによって、第1のコア11と第2のコア12への信号光および励起光のパワの分配度をほぼ一樣にすることができる。これは有効コア径を大きくすることにも寄与し、非線形現象の抑圧と、偏光依存性の利得の偏差の低減に効果的である。

【0027】図5(a)は本発明の波長多重伝送用Er

添加光ファイバ増幅器を実現するEr添加光ファイバ光ファイバの他の構成を示し、図2(a)、図3(a)および図4(a)と同一の構成を有するが、図5(b)

(c)は前述した実施の形態と相違する第9および第10の実施の形態としての屈折率分布を示している。この屈折率分布を形成する $\Delta n$ 、 $\Delta n'$ 、 $\Delta n''$ 、 $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_1'$ 、 $\Delta n_2$ および $\Delta n_3$ は図示の通りである。この屈折率分布から明らかなように、第1のコア(屈折率 $n_w$ )11への信号光および励起光のパワの集中がなくなり、第1のコア11および第2のコア(屈折率 $n_r$ )12へ均等に分配される。その結果、第5より第8の実施の形態と同じ効果が得られる。

【0028】図6(a)は本発明の波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を実現するEr添加光ファイバの他の構成を示す。このEr添加光ファイバは、略中心にErとAlの共添加されたSiO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub>系ガラスの第1のコア11(直径D<sub>1</sub>、屈折率 $n_w$ )11を有し、その外周にErとAlの共添加されていないSiO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub>系ガラスの第2のコア11(直径D<sub>2</sub>、屈折率 $n_r$ )13を有し、その外周にクラッド(屈折率 $n_c$ )8を設けている。図6(b)は屈折率分布を示し、第1のコア11とクラッド8との比屈折率差を $\Delta n_3$ 、第1のコア11と第2のコア13との比屈折率差を $\Delta n_1$ 、第2のコア13とクラッド8との比屈折率差を $\Delta n_2$ とする。ここで、 $\Delta n_3$ を1%以下、 $\Delta n_2$ を0.5%以下、D<sub>1</sub>/D<sub>2</sub>を0.5以下に設定すると、波長1.55 $\mu$ mにおける有効コア径を9 $\mu$ m以上で、かつゼロ分散波長を1.53 $\mu$ mから1.56 $\mu$ mの範囲外の波長にすることができる。

【0029】図7(a)は本発明の波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を実現するEr添加光ファイバの他の構成を示し、コア10の屈折率分布を除いて図1(a)の構成と同一である。コア10は、中心コア10aと外周コア10bを有し、図7(b)、(c)は中心コア10aの屈折率 $n_w$ を外周コア10bの屈折率 $n_r$ より小さくした構成を示している。従って、図1(a)のEr添加光ファイバの効果に加えて中心コア10aへの信号光および励起光のパワの集中を抑制してパワの均一な分配の効果を更に向上させることができる。

【0030】次に、図1から図7のEr添加光ファイバを用いて波長多重伝送用Er添加光ファイバ増幅器を実現する構成を図8を参照して説明する。図8において、入力光ファイバ14a、出力光ファイバ14b、WDMカプラ4aおよび4bを構成する光ファイバ、および、光アイソレータ2aおよび2bを構成する光ファイバとして、波長1.55 $\mu$ mにおける有効コア径が9 $\mu$ m以上であり、ゼロ分散波長が1560nmよりも長波長側にある分散シフトファイバを用いる。当然、Er添加光ファイバ1は図1より図7で示したものである。このような構成にすると、有効コア径がすべて9 $\mu$ m以上の光



ファイバ、および光部品で構成されていることになるので、光ファイバ増幅器での非線形現象の発生はほとんど無くなり、波形歪みの発生のない高品質の光増幅を行うことができる。また、偏光依存性による利得の変動も抑えられる。更に、光部品間の接続損失、反射損失を低減することができる。図 1 から図 7 の E r 添加光ファイバにおいて、コア内に添加する E r の濃度は 5 0 p p m から 1, 0 0 0 p p m の範囲が好ましく、A l の濃度は 1, 0 0 0 p p m から 6 0, 0 0 0 p p m の範囲が好ましい。また、各コア内の E r および A l の濃度は同一である必要はない。更に、コアの組成は、S i O<sub>2</sub> - G e O<sub>2</sub> 系ガラスの他に、S i O<sub>2</sub> - G e O<sub>2</sub> - P<sub>2</sub> O<sub>5</sub> 系ガラス、S i O<sub>2</sub> - P<sub>2</sub> O<sub>5</sub> 系ガラス、これらのガラスにフッ素を添加したもの、等を用いることができる。

【0031】なお、図 8 の光増幅器の構成において、光アイソレータ 2 a, 2 b の前あるいは後、または WDM カプラ 4 a, 4 b の前あるいは後に分散補償ファイバを設けることによって、波長多重伝送された信号光の分散を補償すると、より高品質の伝送増幅を行うことができる。また、光アイソレータ 2 a の代わりに 3 端子の光サーキュレータを用い上記 3 端子の 1 つの端子より信号光を入力させ、2 番目の端子にファイバグレーティングを挿入して、このグレーティングでそれぞれの波長の信号光を反射させて分散補償を行い、3 番目のポートより出力させ、その後、E r 添加光ファイバ 1 内へ信号光を入射させることにより、分散補償された信号光をそれぞれ増幅するようにしてもよい。光アイソレータ 2 b の代わりに 3 端子の光サーキュレータを用い、E r 添加光ファイバ 1 で増幅されたそれぞれの波長の信号光を 1 番目の端子に入力させ、その後 2 番目の出力端に上記ファイバグレーティングを設けて、ここでそれぞれの信号光の分散補償を行って反射させ、3 番目の端子より出力させるようにしてもよい。

#### 【0032】

【発明の効果】以上説明した通り、本発明の波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器によると以下の効果を得ることができる。

(1) 波長 1. 5 5  $\mu$ m における有効コアの径を 9  $\mu$ m 以上にし、かつ、ゼロ分散波長を 1. 5 3  $\mu$ m から 1. 5 6  $\mu$ m の範囲外の波長にしたので、波長多重数が 8

波、1 6 波、3 2 波、6 4 波・・・のように増えても、非線形現象の誘発のおそれがなく、その現象による波形歪みの発生を抑えることがない。

(2) 波長 1. 5 5  $\mu$ m における有効コア径を 9  $\mu$ m 以上にし、かつ、ゼロ分散波長を 1. 5 3  $\mu$ m から 1. 5 6  $\mu$ m の範囲外の波長にしても、コア内の信号光のパワの分布を均一にしたので、波長 1. 5 3  $\mu$ m から 1. 5 6  $\mu$ m の広い波長域にわたって平坦な利得特性を実現することができる。

(3) E r 添加光ファイバの構造パラメータを多くした

ので、利得特性、飽和出力特性、等の特性を容易に制御することができる。

(4) 波長多重数が 8 波、1 6 波、3 2 波、6 4 波・・・のように増えてきても、信号光のパワが各コア内に分配されて伝搬していくため、ホールバーニングに依存した偏光依存性による利得の偏差を小さく抑えることができる。そのため、E r 添加光ファイバ増幅器をカスケードに 1 0 段、2 0 段と接続してもこの利得の偏差を小さく抑えることができ、光信号／雑音の比の劣化が小さいシステムを構築することが出来る。

(5) E r 添加光ファイバ増幅器に用いるファイバ型部品（光アイソレータ、WDM フィルタ、等）、入出力用光ファイバの有効コア径を 9  $\mu$ m 以上に行っているため、これらの光ファイバ間の接続損失を小さくすることができ、また接続も容易に行うことができ、さらに非線形現象の誘発を抑えることができる。

(6) 以上述べた効果に基づき、大容量の情報を高速で長距離伝送することができる波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を構成することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】(a) 本発明の第 1 および第 2 の実施の形態における波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を実現する E r 添加光ファイバの構成を示す断面図。

(b) 第 1 の実施の形態における E r 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

(c) 第 2 の実施の形態における E r 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

【図 2】(a) 本発明の第 3 および第 4 の実施の形態における波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を実現する E r 添加光ファイバの構成を示す断面図。

(b) 第 3 の実施の形態における E r 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

(c) 第 4 の実施の形態における E r 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

【図 3】(a) 本発明の第 5 および第 6 の実施の形態における波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を実現する E r 添加光ファイバの構成を示す断面図。

(b) 第 5 の実施の形態における E r 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

(c) 第 6 の実施の形態における E r 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

【図 4】(a) 本発明の第 7 および第 8 の実施の形態における波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を実現する E r 添加光ファイバの構成を示す断面図。

(b) 第 7 の実施の形態における E r 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

(c) 第 8 の実施の形態における E r 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

【図 5】(a) 本発明の第 9 および第 1 0 の実施の形態における波長多重伝送用 E r 添加光ファイバ増幅器を



現する Er 添加光ファイバの構成を示す断面図。

(b) 第 9 の実施の形態における Er 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

(c) 第 10 の実施の形態における Er 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

【図 6】 (a) 本発明の第 11 の実施の形態における波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器を実現する Er 添加光ファイバの構成を示す断面図。

(b) 第 11 の実施の形態における Er 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

【図 7】 (a) 本発明の第 12 および第 13 の実施の形態における波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器を実現する Er 添加光ファイバの構成を示す断面図。

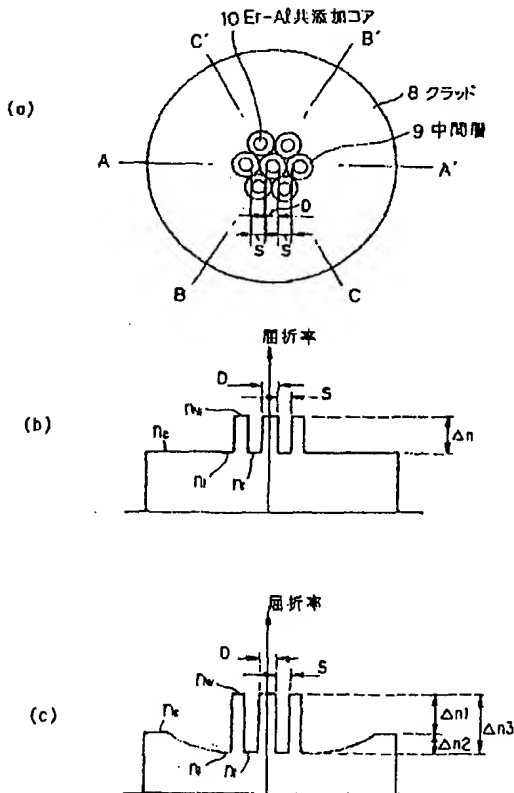
(b) 第 12 の実施の形態における Er 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

(c) 第 13 の実施の形態における Er 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

【図 8】 従来および本発明の波長多重伝送用 Er 添加光ファイバ増幅器を示す説明図。

【図 9】 (a) 従来の Er 添加光ファイバを示す断面 20

【図 1】



図。

(b) 従来の Er 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

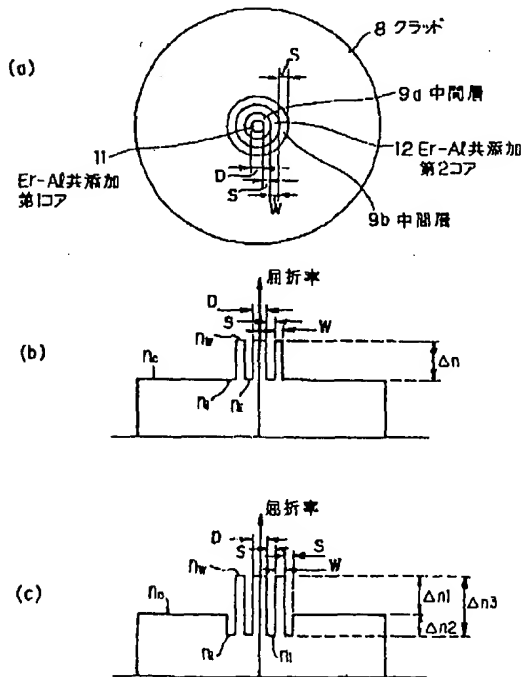
【図 10】 (a) 従来の Er 添加光ファイバを示す断面図。

(b) 従来の Er 添加光ファイバの屈折率分布を示す説明図。

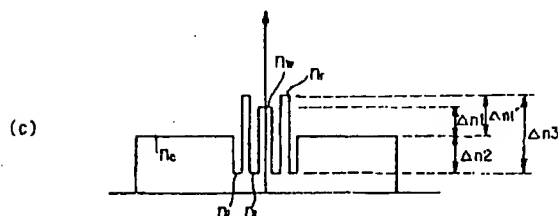
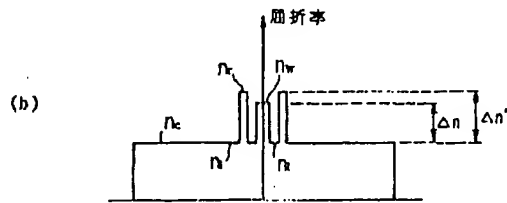
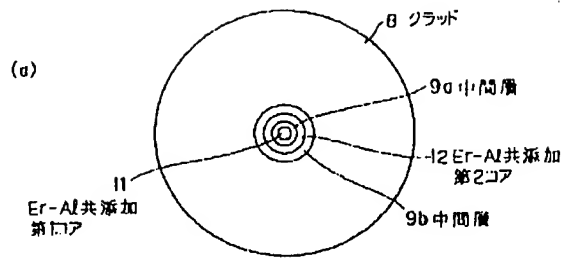
【符号の説明】

- |                    |             |
|--------------------|-------------|
| 1                  | Er 添加光ファイバ  |
| 2 a, 2 b           | 光アイソレータ     |
| 3 a, 3 b           | 励起光源        |
| 4 a, 4 b           | WDM カブラ     |
| 5 a, 5 b, 5 c, 5 d | 信号光         |
| 6 a, 6 b, 6 c, 6 d | 励起光         |
| 7, 10, 11, 12      | Er-Al 共添加コア |
| 8                  | クラッド        |
| 9, 9 a, 9 b        | 中間層         |
| 14 a               | 入力光ファイバ     |
| 14 b               | 出力光ファイバ     |

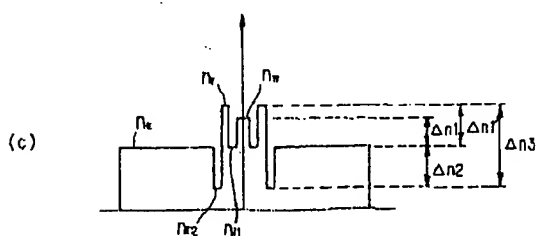
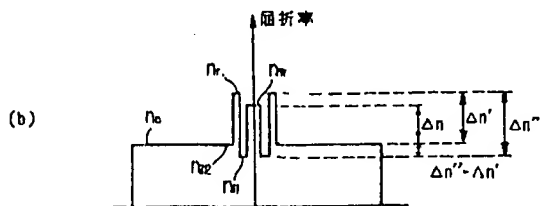
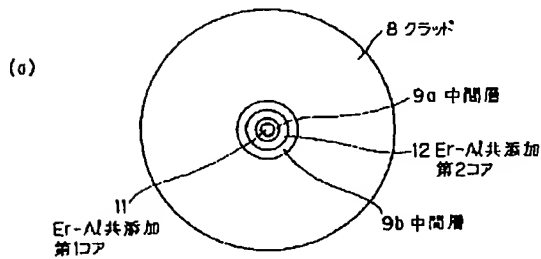
【図 2】



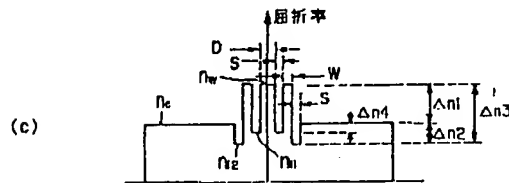
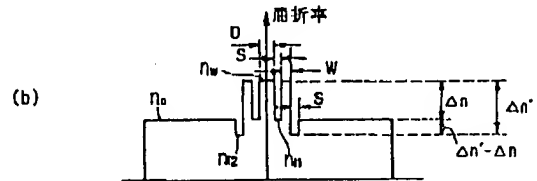
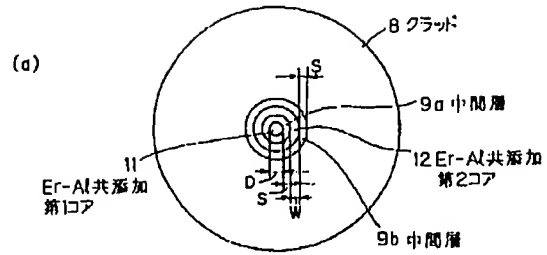
【図 3】



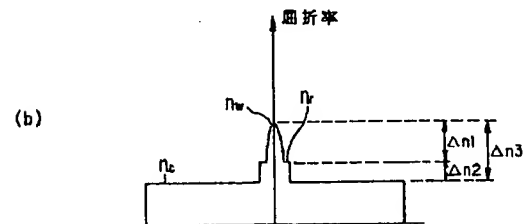
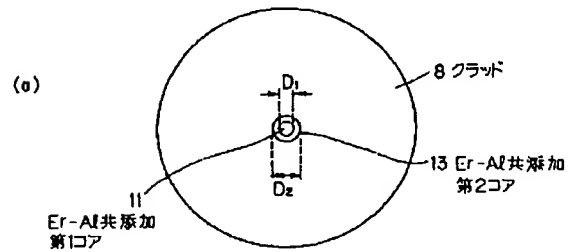
【図 5】



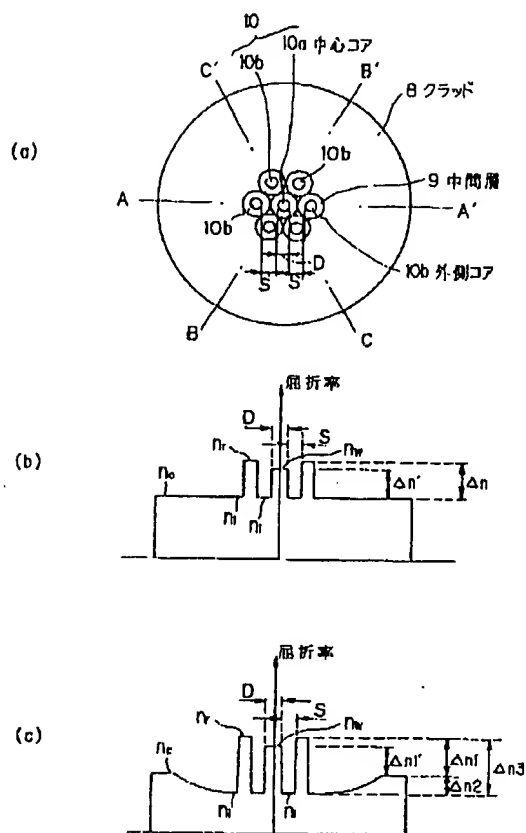
【図 4】



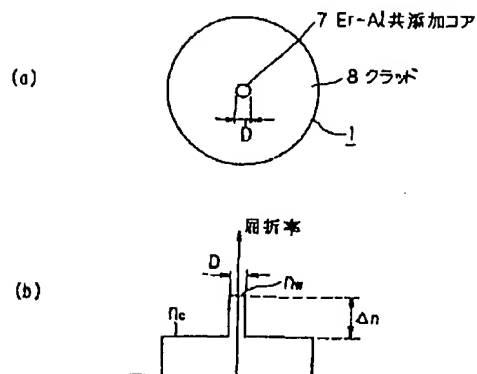
【図 6】



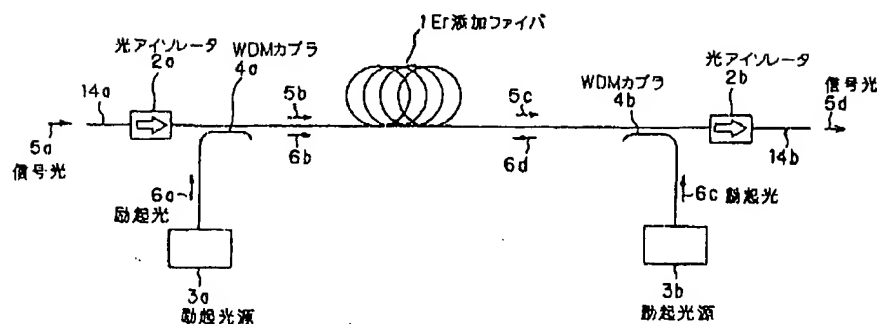
【图7】



【图9】



【图 8】





1. Introduction                      Expansion of waveband and increase in the number of wavelengths are required for the wavelength division multiplex (WDM) technology to realize a high-capacity and performance photonic network. Considering a low-loss wavelength region reaching 200 nm in quartz optical fibers and recent progress in a new waveband WDM light amplification technology [1, 2] and propagation technology [3], it is possible that an ultrawide wavelength region of about 50-200 nm with 1550 nm (at which the loss takes a minimum) as a center will be used in the future. This report indicates a nonlinear optical effect (referred to as an interband nonlinear effect) which creates a new problem when such ultrawide wavelength region WDM signal light propagates in a fiber and shows that bi-directional propagation in each band effectively suppresses the nonlinear effect.

## 2. Interband nonlinear effect

A study relating to nonlinear interaction between signal lights disposed at a distance of no less than 50 nm from each other theoretically showed the depression of short-wavelength signal light caused by stimulated Raman scattering (SRS) [4].

However, if the utilization of the ultrawide wavelength region is considered as a simultaneous utilization of a plurality of bands with different signs and magnitudes of the fiber dispersion value, then the degradation of signal will supposedly be caused by the following nonlinear effects occurring between the bands.

[SRS depression] SRS-induced depression becomes a light SN degradation of a short-wavelength signal light. Moreover, when the walk-off between the bands is small, the code pattern dependence becomes significant and waveform is degraded.

[Non-degenerate four-wave mixing (nd-FWM)] When two bands are located on both sides of a zero-dispersion wavelength, the phase matching condition is satisfied and nd-FWM is generated even between bands at a distance of no more than several tens of nanometers from each other.

[Cross-phase modulation (XPM)] When two bands are located on both sides of a zero-dispersion wavelength and the dispersion of each band is large, a signal light which underwent interband XPM under a condition

of small walk-off has a large dispersion, which results in a waveform degradation.

The above-described characteristics depend only on the dispersion value and are generally discussed with respect to all fibers with different signs and magnitudes of the dispersion value in a signal band

#### 4. Suppression of degradation by bidirectional propagation per band      Interband nonlinear

interaction can be suppressed by propagation in mutually opposite directions in two bands with a small relative walk-off. This result can be explained as follows. Thus, during bidirectional propagation, for nd-FWM, the phase matching condition is not satisfied, for SRS, pattern-dependent deposition is averaged by an extremely large walk-off, and for XPM, phase modulations eliminate each other also because of walk-off. Symbol  $\diamond$  in Fig 2 represents the results of bidirectional propagation conducted to confirm the above conclusions. Sensitivity degradation was not observed in the entire band. However, even in this case, the short-wavelength signal light undergoes losses due to SRS ( $\sim 0.9$  dB/40 ( $\sim 0.9$  dB/40 km at a short-wavelength side Ch1), degrading the light S/N.



5. Conclusion The influence of interband nonlinear effect which is a new limitation factor in ultrawide-wavelength band WDM propagation was clarified and the efficiency of bidirectional propagation per each band as a method for suppressing such an effect was confirmed.